



---

# Rechnernetze II

SoSe 2025

Roland Wismüller  
Betriebssysteme / verteilte Systeme  
roland.wismueller@uni-siegen.de  
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 1. April 2025



---

# Rechnernetze II

SoSe 2025

## 11 Drahtlose Sensornetze

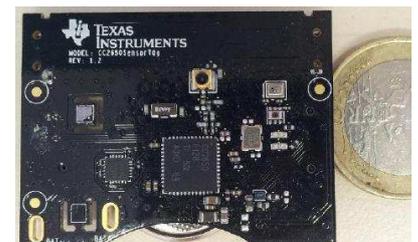
## Inhalt

- ➔ Einführung
- ➔ MAC-Protokolle
- ➔ Routing
  
- ➔ Holger Karl, Andreas Willig: *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Wiley, 2005
- ➔ Koen Langendoen:  
*Medium Access Control in Wireless Sensor Networks*
- ➔ Pei Huang *et al*: *The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 1, 2013, S. 101-120

## 11.1 Einführung

### Drahtlose Sensornetze (WSN)

- ➔ Ziel: Überwachung ausgedehnter Gebiete / Strukturen
  - ➔ Umweltmonitoring, Landwirtschaft, intelligente Gebäude, Strukturüberwachung von Bauwerken, Patienten-Monitoring, Industrie, Logistik, ...
- ➔ Batteriebetriebene Sensorknoten mit Sensorik, CPU, Radio
- ➔ Vernetzung ohne Infrastruktur
  - ➔ ad-hoc Netzwerk, selbstorganisierend
- ➔ Typische Eigenschaften von WSNs:
  - ➔ viele Knoten, hohe Knotendichte
  - ➔ beschränkte Ressourcen (Energie, CPU-Leistung, Reichweite)
  - ➔ Dynamik (Ausfälle, mobile Knoten)



### Kommunikation in WSNs

- ➔ Eigenschaften der Funkgeräte (Radios)
  - geringe Sendeleistung  $\Rightarrow$  i.A. multi-hop Kommunikation
  - Stromverbrauch für Senden und Empfang etwa gleich
    - zur Energieeinsparung: Radio abschalten
    - Umschalten zwischen den Modi kostet Energie
- ➔ Kommunikationsstruktur
  - häufig eine Senke (mit Anbindung an LAN/WAN)
  - Kommunikationsformen: *flooding*, *convergecast*, *local gossip*
    - periodisch oder ereignisgetrieben
    - bei *convergecast*: Datenaggregation ist wichtig
  - Adressierung über Ort / Eigenschaften der Knoten
    - *data centric network* / *data centric routing*

#### Anmerkungen zu Folie 357:

Beispiel zum Stromverbrauch: Radio CC2420 von TI

- ➔ im *Power down* Modus: 1 - 20  $\mu\text{A}$  (je nach Modus)
- ➔ beim Empfang: 18.8  $\text{mA}$
- ➔ beim Senden: 8.5 - 17.4  $\text{mA}$ , je nach Sendeleistung (3  $\mu\text{W}$  - 1  $\text{mW}$ )



### Zielsetzung

- ➔ Funkgeräte sollen möglichst oft ausgeschaltet sein
- ➔ Gründe für überflüssigen Energieverbrauch:
  - **Idle listening**: Funkgerät ist eingeschaltet, obwohl niemand eine Nachricht sendet
  - **Overhearing**: Knoten empfängt eine Nachricht, die er nicht weitergeben / verarbeiten muß
  - **Kollisionen**: insbes. durch *Hidden Station Problem*
    - RTS/CTS bei kleinen Datenmengen nicht sinnvoll
  - **Verkehrs-Fluktuationen**: zeitlich und räumlich
    - führt ggf. zu *Overprovisioning*
  - **Protokoll-Overhead**: MAC-Header, Steuernachrichten
    - daher ausgeklügelte Protokolle oft nicht verwendbar

## 11.2 MAC-Protokolle für WSNs ...



### Allgemeine Ansätze für MAC-Protokolle

- ➔ *Random Access (Contention based)*
  - Knoten können jederzeit versuchen, das Medium zu nutzen
  - verschiedene Varianten von CSMA
- ➔ *Fixed Assignment*
  - den Knoten werden statisch exklusive Ressourcen zugeteilt:
    - Zeitschlitz ( *Time Division Multiple Access*, TDMA)
    - Frequenzen ( *Frequency Division Multiple Access*, FDMA)
    - Codes ( *Code Division Multiple Access*, CDMA)
    - Raumgebiet ( *Space Division Multiple Access*, SDMA)
- ➔ *Demand Assignment*
  - Zuteilung der Ressourcen (Zeit, Frequenz) erfolgt dynamisch
    - z.B. *Token Ring*

## Anmerkungen zu Folie 359:

Bei CDMA werden Verfahren ähnlich der DSSS Spreizbandtechnik verwendet, wobei jeder Sender eine andere Bitfolge (Barker-Code, vgl. Folie 82) verwendet. Dadurch kann man selbst aus einem überlagerten Signal die ursprünglichen Daten ermitteln.

Ein einfaches Beispiel für SDMA ist die Verwendung unterschiedlicher Adern in einem Kabelbündel. Bei kabelloser Übertragung kann SDMA z.B. über eine entsprechende Antennentechnik realisiert werden, die sicherstellt, daß das Signal nur in eine bestimmte Richtung, d.h. ein bestimmtes Raumgebiet gesendet wird (*Beam forming*).

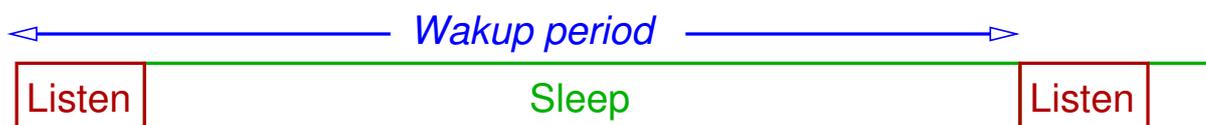
359-1

## 11.2 MAC-Protokolle für WSNs ...



### Grundprinzip energiesparender MAC-Protokolle

- ➔ Funkgeräte werden periodisch für kurze Zeit eingeschaltet, um nach eintreffenden Nachrichten zu lauschen (*Duty Cycle*)

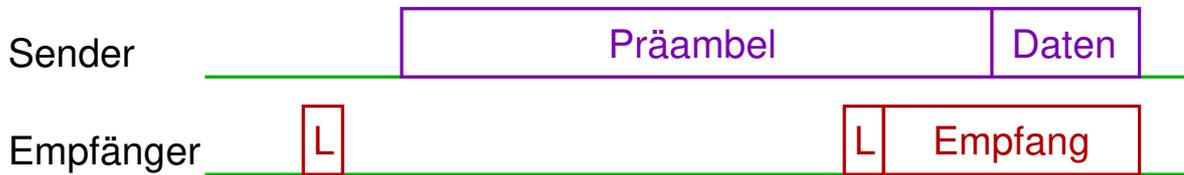


- ➔ Problem: Senden nur möglich, wenn Empfänger aktiv ist
- ➔ Lösungsansätze:
  - ➔ asynchrone Protokolle: Sender hat kein a-priori Wissen, wann Empfänger aktiv ist
  - ➔ synchrone Protokolle: Sender weiß, wann Empfänger aktiv ist
  - ➔ Frame-basierte Protokolle: *Listen*-Periode wird zur Kollisionsvermeidung in Zeitschlitz unterteilt



### Asynchrone Protokolle: B-MAC

- ➔ Idee: Sender sendet vor dem Paket eine lange Präambel
  - ➔ wenn Empfänger Präambel hört, bleibt er wach

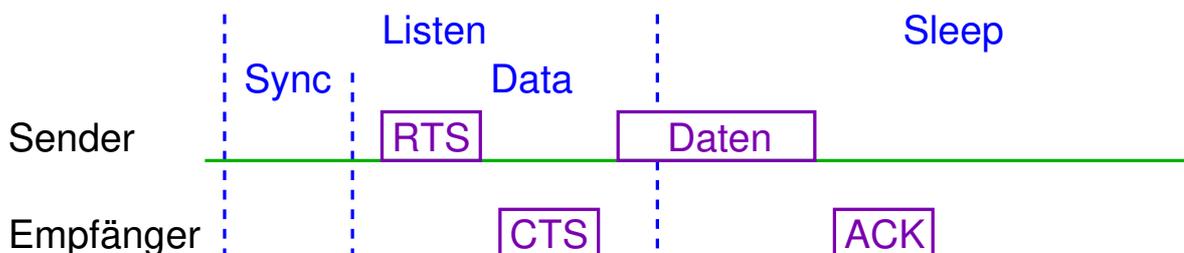


- ➔ *Low Power Listening*: Beim Abhören des Mediums (auch für CSMA) wird nur Signalstärke ausgewertet
- ➔ Optimierungen:
  - ➔ Folge kurzer Präambeln mit Zieladresse: kein *Overhearing*
  - ➔ zusätzlich: Zeitdauer bis zur Datenübertragung in Präambel
    - ➔ kein *Idle Listening*
- ➔ Nachteil: Sender verbraucht viel Energie



### Synchrone Protokolle: S-MAC

- ➔ Idee: Knoten synchronisieren ihre *Listen*- und *Sleep*-Zeiten
  - ➔ nicht global, sondern in räumlichen Clustern
  - ➔ Knoten kann ggf. in zwei Clustern sein
- ➔ Zusätzlich RTS/CTS zur Kollisionsvermeidung



- ➔ Variante: T-MAC
  - ➔ adaptive *Listen*-Periode, wird bei Aktivität verlängert
- ➔ Nachteil: Synchronisationsaufwand, nur wenige Hops pro Periode

### Frame-basierte Protokolle: L-MAC

- ➔ Idee: Kollisionsvermeidung durch Einführung von Zeitschlitz



- ➔ Knoten senden nur in „ihrem“ Zeitschlitz
  - ➔ Header (in jeder Periode, zur Synchronisation)
    - ➔ enthält Bitmaske der durch Nachbarn belegten Zeitschlitz
    - ➔ ggf. gefolgt von Nutzdaten
- ➔ Ermittlung freier Zeitschlitz:
  - ➔ Oder-Verknüpfung aller empfangener Bitmasken
  - ➔ wähle freien Zeitschlitz zufällig, Wiederholung bei Kollision
- ➔ Nachteil: Overhead im Header, begrenzte Zahl an Nachbarn

#### Anmerkungen zu Folie 363:

Eine Kollision wird in diesem Fall von den gemeinsamen Nachbarn der betroffenen Knoten festgestellt:

- ➔ Beide Knoten senden in dem von ihnen gewählten (d.h. demselben) Zeitschlitz ihren Header.
- ➔ Dadurch kommt es bei den gemeinsamen Nachbarn zu einer Kollision, d.h., diese empfangen in dem Zeitschlitz keine gültigen Daten.
- ➔ Die gemeinsamen Nachbarn geben daraufhin die Nummer des betroffenen Zeitschlitzes in ihrem Header an alle ihre Nachbarn (und damit auch die kollidierenden Knoten) weiter.

### Einige Aspekte

- ➔ Kommunikationsform / Routing-Schema:
  - ➔ *unicast*: Punkt-zu-Punkt
  - ➔ *broadcast* / *convergecast*: Baumstruktur
  - ➔ *geocast*: geographisches Routing
    - ➔ Adressierung über den Ort, Ortsinformation zum Routing
- ➔ Energieeffizienz
  - ➔ Minimierung der Energie pro Paket (bzw. Bit)
  - ➔ Maximierung der Lebensdauer des Netzes
  - ➔ Verbleibende Restenergie in den Batterien
  - ➔ Abwägung zu andern Metriken (Verzögerung, Zuverlässigkeit)
- ➔ *Multipath* Routing: Erhöhung der Zuverlässigkeit
- ➔ Mobile Knoten

### Anmerkungen zu Folie 364:

Die Lebensdauer des Netzes kann unterschiedlich definiert werden, z.B.:

- ➔ bis zum Ausfall des ersten Knotens,
- ➔ bis ein bestimmter Prozentsatz an Knoten ausfällt,
- ➔ bis das Netz in zwei oder mehr Teile zerfällt, die nicht mehr miteinander kommunizieren können,
- ➔ bis die Sensorabdeckung des untersuchten Gebiets nicht mehr ausreichend ist, etc.

Um die Verbleibende Restenergie in den Batterien zu maximieren, kann man z.B. so vorgehen: Die minimale Restenergie auf einem Pfad sei das Minimum der Restenergien aller Knoten auf dem Pfad. Man wählt unter allen möglichen Pfaden dann immer den, der die höchste minimale Restenergie besitzt. Dadurch wird sichergestellt, daß der Pfad nicht über einen Knoten geht, dessen Batterie schon fast leer ist (zumindest, wenn es noch Alternativpfade gibt).

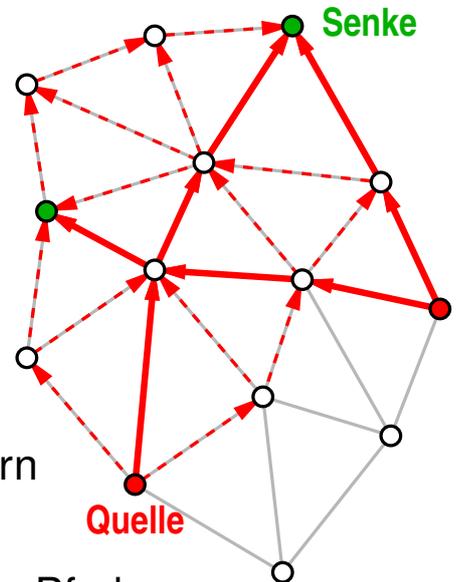
## 11.3 Routing in WSNs ...



(Animierte Folie)

### Beispiel: Datenzentrisches Routing mit *Directed Diffusion*

- ➔ Senken fordern periodische Informationen von Quellen an
- ➔ Vier Schritte:
  - *Interest propagation*
    - Anforderung an alle Knoten verteilen (z.B. Flooding)
  - *Gradient setup / Exploratory data*
    - Daten mit geringer Rate entlang aller Pfade
  - *Reinforcement*
    - Empfänger wählt beste(n) Nachbarn
  - *Data delivery*
    - Daten mit hoher Rate entlang eines Pfads



## 11.4 Zusammenfassung



- ➔ Sensorknoten mit beschränkter Energie und Rechenleistung
- ➔ Selbstorganisierende Vernetzung
- ➔ Typisch: Kommunikation in Baumstruktur
- ➔ Adressierung über Ort bzw. Eigenschaften der Knoten
- ➔ Energiesparende MAC-Protokolle
  - Vermeidung von *Idle listening*, *Overhearing* und Kollisionen
  - Randbedingungen: Verkehrs-Fluktuationen, Protokoll-Overhead
  - Grundidee: *Low Duty Cycle*
- ➔ Routing
  - Berücksichtigung der Energie bei der Routenauswahl
  - *Data centric routing*